



O INCREMENTO DA RECARGA COMO COMPONENTE DUMA ESTRATÉGIA PARA A UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA NAS REGIÕES COSTEIRAS FACE ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Júlio F. FERREIRA da SILVA

*Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica Professor Auxiliar do Departamento de Eng^a Civil da Universidade do Minho,
Azurém 4800-058 Guimarães, Portugal
253510200, juliofs@civil.uminho.pt*

RESUMO

Neste trabalho faz-se uma análise quantitativa dos efeitos do incremento da recarga no controlo da utilização de aquíferos do litoral sujeitos à intrusão salina provocada pela projectada subida do nível do mar. Em muitas zonas do litoral os aquíferos costeiros são a principal origem de água para abastecimento. A subida do nível do mar tem como consequência o inevitável avanço da cunha salina marinha em direcção ao continente. Sendo a utilização da água subterrânea economicamente interessante, aconselhariam os princípios de gestão de recursos hídricos o aproveitamento de parte da água que se escoia superficial ou subterraneamente e que se dirige, inevitavelmente, para o mar. A extracção de água subterrânea deve respeitar regras para que seja possível manter sob controlo a intrusão marinha. O incremento da recarga é uma medida de gestão que pode ajudar nesse controlo. A condução e introdução no aquífero de água superficial proveniente de linhas de águas vizinhas ou de águas pluviais e residuais tratadas permite aumentar o volume de água doce no aquífero e, assim, impelir a água salgada em direcção ao mar. A metodologia desenvolvida faculta o estudo do efeito da subida do nível do mar e do incremento da recarga nas extracções máximas permitidas para que a interface se mantenha além de determinada distância de segurança. Calcula-se o acréscimo na extracção em função das quantidades disponíveis para recarga. Dotando antecipadamente os sistemas de captação e de água abastecimento de água a partir dos aquíferos costeiros dum sistema de controlo da poluição salina poder-se-á mitigar os efeitos nefastos das alterações climáticas. O estudo desenvolvido evidencia que os efeitos da subida do nível do mar são diversos em função da distância à linha de costa das extracções, o que realça a importância dum adequado planeamento dos locais de construção das captações. Conclui-se que o incremento da recarga contribui para a utilização controlada e sustentável da água subterrânea e, consequentemente, para a gestão racional dos recursos hídricos disponíveis nas regiões costeiras.

Palavras-chave: Gestão de aquíferos costeiros, Gestão integrada de águas subterrâneas e águas superficiais, Intrusão salina, Modelação de águas subterrâneas, Optimização da exploração de aquíferos.

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho divulga-se um modelo para o aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis nas regiões costeiras face às alterações climáticas, ou seja para a gestão conjuntiva dos recursos hídricos disponíveis nas zonas do litoral, com o objectivo de usar a água disponível para mitigar os efeitos da projectada subida do nível do mar. As espectáveis alterações climáticas poderão motivar o avanço progressivo dos volumes de água salgada e a subsequente redução dos volumes de água doce nos aquíferos costeiros. O avanço da cunha salina marinha poderá ser eventualmente contrariado adoptando um conjunto de medidas entre as quais figura o incremento da recarga. O uso de uma parcela da água superficial disponível na região ou das águas pluviais ou residuais devidamente tratadas para incrementar a recarga contribui para o aumento das extracções e para o controlo do fenómeno da intrusão marinha.

A qualidade da água para o incremento da recarga deve obedecer a um adequado controlo. O incremento da recarga pode, inclusive, ser a operação final de afinamento dum processo de tratamento da água ou uma forma eficaz de a armazenar, em especial nas zonas sujeitas a forte evaporação. Recomendações para a utilização da recarga e normas de qualidade estão disponíveis em diversos organismos internacionais como a UNESCO, a Agência Norte-americana do Ambiente, a Organização Mundial de Saúde, etc.

O principal problema a resolver será determinar a extracção máxima permitida e as quantidades de água a usar na recarga para manter a interface água doce / água salgada além de determinada distância aos pontos de controlo. O incremento da recarga deverá ser realizado se acarretar vantagens técnicas, ambientais e económicas ou, pelo menos, se não agravarem significativamente os custos de exploração. No entanto, a implementação dum sistema que incrementa a recarga disponibiliza aos gestores dos sistemas de captação um verdadeiro meio de controlo da intrusão marinha.

Nos itens seguintes descrevem-se os modelos de simulação do fenómeno intrusão salina, faz-se a caracterização geral do sistema aquífero objecto dos estudos, determinam-se as extracções máximas admissíveis face a determinada quantidade de água disponível para recarga e mostra-se o resultado nas extracções do incremento da recarga no controlo da intrusão salina face aos cenários de subida do nível do mar sem sistema de incremento da recarga. Finalmente, far-se-á a análise de resultados e apresentadas as respectivas conclusões.

2 - IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

O problema da concepção e da gestão optimizadas de sistemas de captação e de abastecimento de água a partir de aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina consiste em determinar os melhores locais de implantação e as respectivas extracções que satisfaçam as solicitações dos utilizadores, mantendo, no entanto, o controlo sob o fenómeno da intrusão salina. O problema que pretende resolver-se aqui consiste em determinar de forma quantitativa os efeitos do incremento da recarga como medida para minimizar os efeitos da projectada subida do nível do mar, ou seja, pretende calcular-se o efeito na quantidade máxima que é possível extrair se for possível incrementar a quantidade de água que se infiltra ou injecta no aquífero.

Dada a incerteza associada à projecção das alterações climáticas e da, subsequente, quantidade de água disponível para incrementar a recarga, então o estudo realizado teve como propósito cobrir um leque de eventuais cenários, pelo que o modelo de optimização-simulação é chamado a encontrar as extracções máximas para cada eventual local de implantação de um conjunto de captações, para cada valor do nível do mar, para cada cenário do escoamento natural e para cada distância de segurança. Assim, as sucessivas execuções do modelo de gestão varrem os valores compreendidos nos intervalos:

$$x_{s,\min} \leq x_s \leq x_{s,\max} \quad x_s = 520, 540, \dots, 2800 \text{ m} \quad (1)$$

$$B_{\min} \leq B \leq B_{\max} \quad B_i = 14, 14,05 \dots, 15 \text{ m} \quad (2)$$

$$ds_{\min} \leq ds \leq ds_{\max} \quad ds = 100, 200 \dots, 800 \text{ m} \quad (3)$$

em que: $X_{s,\min}$ e $X_{s,\max}$ os limites da implantação de cada captação subterrânea, ou seja a distância à linha de costa; B_{\min} e B_{\max} os limites da altura entre o nível do mar e a base do aquífero; ds - distância de segurança.

Na figura seguinte estão esquematizados os sistemas de captação, de abastecimento de água e de controlo da intrusão salina numa zona costeira.

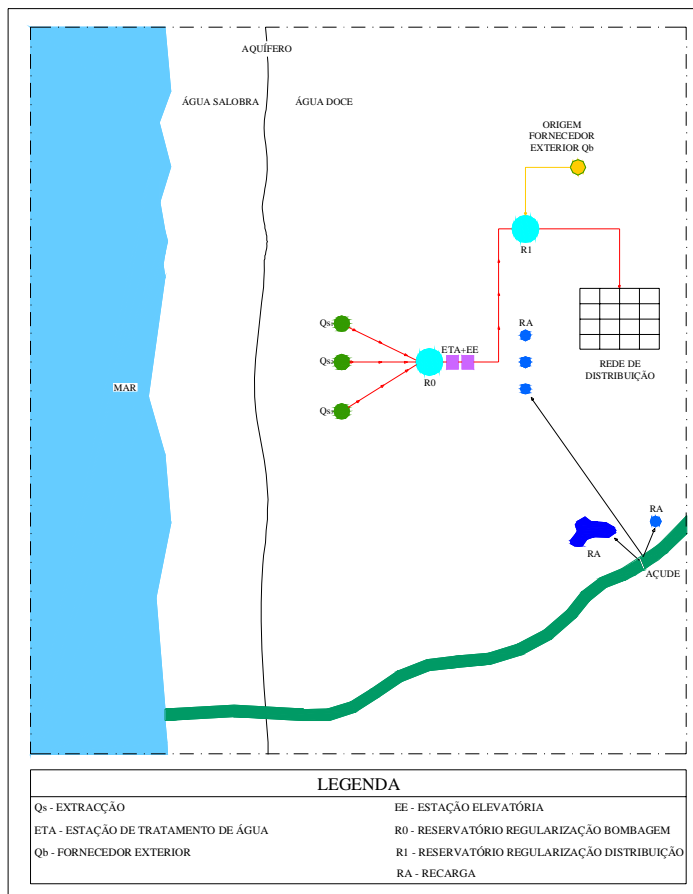


Figura 1 - Esquema de sistema de captação e de abastecimento de água a região costeira

3 MODELO DE GESTÃO DE AQUÍFEROS SUJEITOS À INTRUSÃO SALINA

O adequado planeamento e gestão dos sistemas de captação e de controlo da intrusão marinha em aquíferos costeiros exigem a utilização conjunta de técnicas de optimização e de modelos de simulação do comportamento dos sistemas hídricos das regiões costeiras. A decisão sobre a implementação dum sistema de incremento da recarga que funcione como uma componente dum sistema de controlo da intrusão salina e, subsequentemente, da qualidade da água, deve ser devidamente fundamentada sob os pontos de vista técnico e económico. São diversas as técnicas de optimização que podem ser moldadas para determinarem as melhores políticas de implantação das captações, os regimes de extracção de água doce e as quantidades a infiltrar ou injectar para incremento da recarga. Os modelos de simulação do escoamento subterrâneo, como os defendidos por STRACK (1989) e BAKKER (2002), antecipam o comportamento do aquífero face às alternativas geradas pela ferramenta de optimização. Em FERREIRA DA SILVA (2003) e FERREIRA DA SILVA (2005) defende-se uma metodologia que associa métodos de optimização e modelos de simulação da intrusão marinha em cascata num grau de complexidade crescente.

Aplicando as equações diferenciais do escoamento subterrâneo em meios porosos a cada lado da interface água doce / água salgada, então o escoamento num aquífero costeiro pode ser definido por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(K_{xx})_d \frac{\partial h_d}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(K_{yy})_d \frac{\partial h_d}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{zz})_d \frac{\partial h_d}{\partial z} \right] + Q_d = S_d \frac{\partial h_d}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(K_{xx})_s \frac{\partial h_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(K_{yy})_s \frac{\partial h_s}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[(K_{zz})_s \frac{\partial h_s}{\partial z} \right] + Q_s = S_s \frac{\partial h_s}{\partial t} \quad (5)$$

Em que: x, y - coordenadas, d água doce; s a água salgada; h - altura piezométrica, Q - caudal extraído ou injectado, S - coeficiente de armazenamento, t - tempo.

A resolução da equação diferencial que caracteriza o escoamento pode realizar-se por via analítica, nalguns casos, e mais genericamente por via numérica. Defende-se que o estudo de sistemas complexos e de grande dimensão deve iniciar-se com o recurso a modelos conceptuais simples para numa segunda fase ser usado um modelo numérico, necessariamente mais refinado.

Strack (1976 e 1989) desenvolveu uma solução exacta para caracterizar o escoamento em aquíferos costeiros com uma linha de costa recta, diversas captações localizadas a x_i do mar e o respectivo caudal Q_i . O potencial é definido, usando o método das imagens, por:

$$\phi = \frac{q}{K} x + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi K} \ln \left[\frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{(x + x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (6)$$

onde: q - escoamento específico; K - condutividade hidráulica; Q_i - extracção / Injecção; (x_i, y_i) coordenadas do local de extracção / injecção; n - número de locais extracção / injecção.

4 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

A formulação matemática do problema envolve a definição da função objectivo e das restrições.

4.1 - OBJECTIVO

O objectivo é matematicamente representado pela maximização das extracções:

$$\max Z = \sum_{s=1}^{N_s} Q_s \quad (7)$$

sendo: Q_s - A extracção em cada captação s ; N_s - Número total de captações.

4.2 - RESTRIÇÕES

O controlo da intrusão salina no aquífero será realizado impondo um valor máximo para a distância entre do "pé" da interface e os pontos de controlo. Estes poderão ser as captações que condicionam a solução, eventualmente as implantadas nos locais mais próximos do mar. Pretendendo implantar um conjunto de captações em linha, então os pontos de controlo serão as captações centrais. Exigindo que a distância de segurança seja respeitada, então limitar-se-á o avanço do pé da interface:

$$(x_{pe})_s \leq (x_{pc})_s - (ds)_s \quad \forall s, \quad s=1, 2, \dots, N_{pc} \quad (8)$$

em que: $(x_{pe})_s$ - distância do pé da interface à linha de costa; x_{pc} - distância do ponto de controlo à linha de costa; ds - distância segurança admissível entre a interface e o ponto de controlo; N_{pc} - número de pontos de controlo.

As restrições são relativas aos limites de extracção de cada captação, às quantidades disponíveis para o incremento da recarga e às cotas piezométricas mínimas:

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \quad i = 1, \dots, N_s \quad (9)$$

$$h_s \geq h_0 \quad s = 1, \dots, N_s \quad (10)$$

em que: $Q_{i,\min}$ e $Q_{i,\max}$ os limites de extracção em cada origem; N_s - Número de origens subterrâneas; h_s a cota piezométrica na captação s ; h_0 a cota piezométrica mínima admissível.

5 - APLICAÇÕES

Os sistemas de captação e de controlo da intrusão objecto dos estudos estão esquematizados na figura 1. Admitir-se-á que as três captações subterrâneas serão implantadas num aquífero com condutividade hidráulica de 100 m/dia e escoamento específico actual de 0,6 m³/m.dia. Considerando que a altura actual da superfície do mar está catorze metros acima da base do aquífero ($B=14,0$ m), então não havendo qualquer extracção o pé da interface localiza-se a 418,54 m da linha de costa. Admitindo sucessivos valores para a distância de segurança, desde a distância mínima de 100 m, depois 200 m até 800 m, as captações poderão ser implantadas, respectivamente, a partir dos 520 m, 620 m, etc. As captações distam entre si 1000 m. O sistema de recarga pode ser composto por trincheiras de infiltração que incrementariam o escoamento específico na zona e/ou por um conjunto de três poços de injeção que estará implantado a 500 m dos locais de captação. Admite-se que no máximo ficará disponível para o incremento da recarga 50 m³/dia por furo, ou seja, 0,6 L/s, valor relativamente pequeno.

5.1 - EXTRACÇÕES MÁXIMAS NUMA BARREIRA DE TRÊS CAPTAÇÕES VERSUS LOCAL DE IMPLANTAÇÃO COM AUMENTO DO NÍVEL DO MAR E MANUTENÇÃO DO ESCOAMENTO NATURAL

A um cenário de subida do nível do mar poderá estar associada uma redução da precipitação e, subsequentemente, do escoamento natural nos aquíferos. Esta projecção teria grandes impactos no equilíbrio água doce / água salgada nos aquíferos costeiros, designadamente, resultaria como inevitável o avanço para o continente da cunha salina marinha. No entanto, o incremento da recarga por infiltração em trincheira de água disponível na região pode revelar-se como uma medida para mitigar aqueles reflexos negativos. O problema que pretende resolver-se consiste em determinar qual será a extracção máxima numa barreira de três captações para que seja assegurado o controlo da intrusão salina, ou seja para manter a interface água doce / água salobra para além duma distância de segurança quando existe um sistema de incremento da recarga que permite a manutenção do valor do escoamento específico em 0,6 m³/m.dia. Admite-se que a extracção máxima em cada captação é de 2000 m³/dia.

Para que continue a respeitar-se uma determinada distância de segurança, face à subida do nível do mar, ter-se-á que reduzir as quantidades a extrair do aquífero. As melhores políticas de extracção para o conjunto das três captações, quando a distância de segurança (ds) é de 300 m e $q=0,6$ m²/dia e para uma subida do nível do mar de 0,10 m são as registadas no quadro seguinte:

Quadro 1 - Extracções em 3 captações vs local de implantação para $ds=300$ m $B=14,10$ m e $q=0,6$ m²/dia

Local (m)	Q_1 (m ³ /dia)	Q_2 (m ³ /dia)	Q_3 (m ³ /dia)	Sum Q (m ³ /dia)
840.00	211,84	149,18	211,84	572,85
(...)				
1000.00	430,16	283,17	430,16	1143,49
(...)				
2000.00	1221,89	648,90	1221,89	3092,69
(...)				
2800.00	1655,48	831,34	1655,48	4142,29

Sendo: Q_1 , Q_2 , Q_3 as extracções máximas, respectivamente, nas captações 1, 2 e 3 (m³/dia) e Sum Q a extracção total na barreira (m³/dia).

De acordo com a hipótese formulada para uma subida de 0,50 m do nível do mar só será possível extrair água doce em locais mais afastados do mar e respeitando os valores máximos em cada captação registados no quadro seguinte:

Quadro 2 - Extracções em 3 captações vs local de implantação para $ds=300\text{m}$ $B=14,50\text{m}$ e $q=0,6\text{m}^3/\text{dia}$

Local (m)	Q_1 (m^3/dia)	Q_2 (m^3/dia)	Q_3 (m^3/dia)	Sum Q (m^3/dia)
860.00	199,06	138,91	199,06	537,02
(...)				
1000.00	392,01	258,06	392,01	1042,08
(...)				
2000.00	1198,49	636,47	1198,49	3033,45
2800.00	1635,99	821,56	1635,99	4093,54

A quantidade total máxima que será possível extrair na barreira de 3 captações em função do local de implantação e da subida do nível do mar para uma distância de segurança de 300,0 m fica registada no quadro seguinte e representada na figura que se lhe segue.

Quadro 3 – Extracção total máxima em 3 captações vs local de implantação para $ds=300\text{ m}$ vs altura da água do mar e $q=0,6\text{m}^3/\text{dia}$

Local (m)	Altura entre a superfície do mar e a base do aquífero (m)								
	14,00	14,10	14,30	14,50	14,60	14,70	14,80	14,90	15,00
740,00	123,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
760,00	230,55	197,18	129,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
780,00	331,49	299,12	233,70	167,36	133,84	100,10	0,00	0,00	0,00
800,00	426,76	395,32	331,78	267,34	234,78	202,00	169,00	135,77	102,32
820,00	516,96	486,39	424,58	361,91	330,25	298,37	266,27	233,96	201,42
840,00	602,63	572,85	512,67	451,65	420,81	389,77	358,52	327,05	295,37
860,00	684,20	655,18	596,51	537,02	506,97	476,70	446,23	415,56	384,68
880,00	762,09	733,76	676,51	618,46	589,13	559,60	529,86	499,93	469,79
900,00	836,62	808,95	753,03	696,32	667,67	638,83	609,78	580,54	551,10
920,00	908,10	881,05	826,38	770,94	742,92	714,72	686,33	657,74	628,96
940,00	976,80	950,33	896,83	842,58	815,17	787,58	759,79	731,82	703,65
960,00	1042,95	1017,03	964,64	911,51	884,67	857,64	830,43	803,04	775,46
980,00	1106,75	1081,35	1030,01	977,94	951,64	925,15	898,49	871,64	844,61
1000,00	1168,40	1143,49	1093,14	1042,08	1016,28	990,31	964,16	937,83	911,32
1020,00	1228,05	1203,61	1154,20	1104,09	1078,78	1053,29	1027,63	1001,79	975,78
1040,00	1285,87	1261,87	1213,35	1164,15	1139,29	1114,26	1089,06	1063,69	1038,15
1060,00	1341,98	1318,39	1270,72	1222,38	1197,96	1173,37	1148,61	1123,69	1098,59
1080,00	1396,50	1373,31	1326,45	1278,93	1254,92	1230,75	1206,41	1181,91	1157,24
1100,00	1449,54	1426,74	1380,65	1333,91	1310,29	1286,52	1262,58	1238,48	1214,22
(...)									
1500,00	2306,40	2288,69	2252,89	2216,59	2198,25	2179,79	2161,19	2142,47	2123,63
(...)									
2000,00	3107,24	3092,69	3063,28	3033,45	3018,38	3003,21	2987,94	2972,56	2957,08
(...)									
2800,00	4154,27	4142,29	4118,09	4093,54	4081,14	4068,65	4056,08	4043,42	4030,67

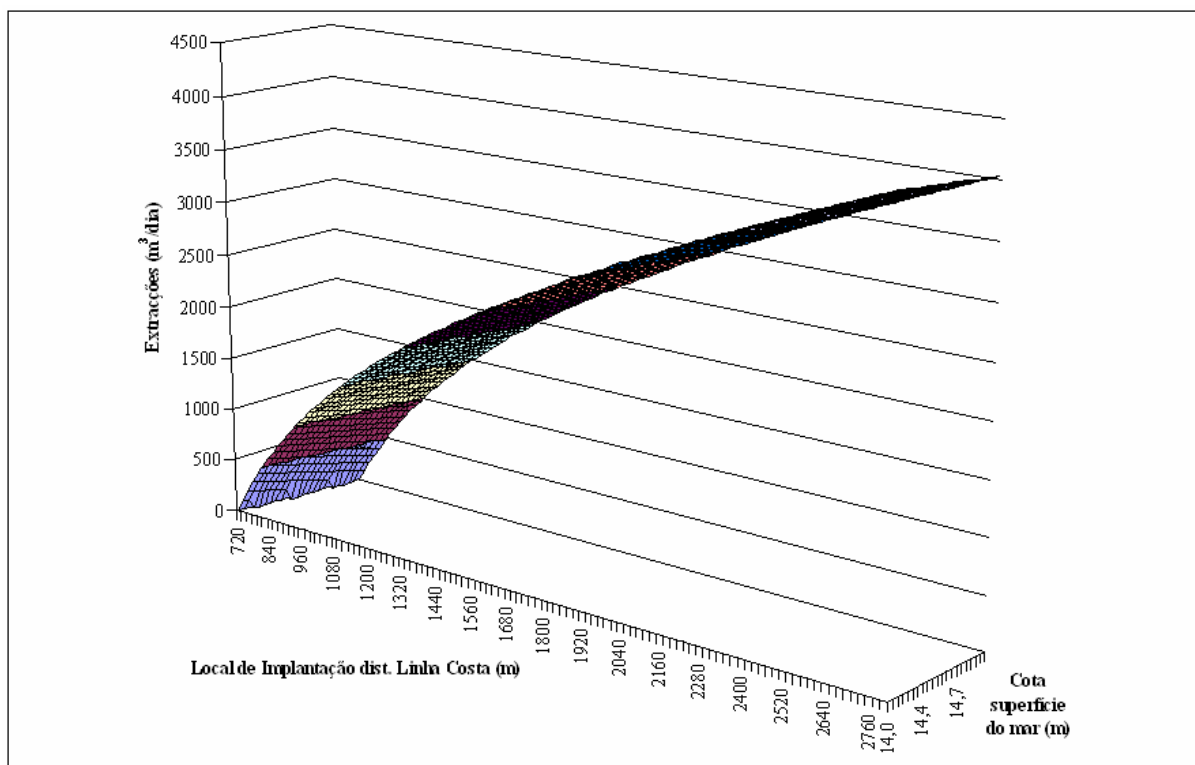


Figura 1 - Extracção total máxima em 3 captações vs local de implantação para $ds=300$ m vs altura da água do mar e $q=0,6\text{m}^2/\text{dia}$

A extracção máxima permitida no conjunto das 3 captações em cada eventual local de implantação, quando a subida do nível do mar é de 0,10 m e para que seja respeitada uma distância entre o pé da interface e a captação central de 300,0 m está representada no gráfico seguinte:

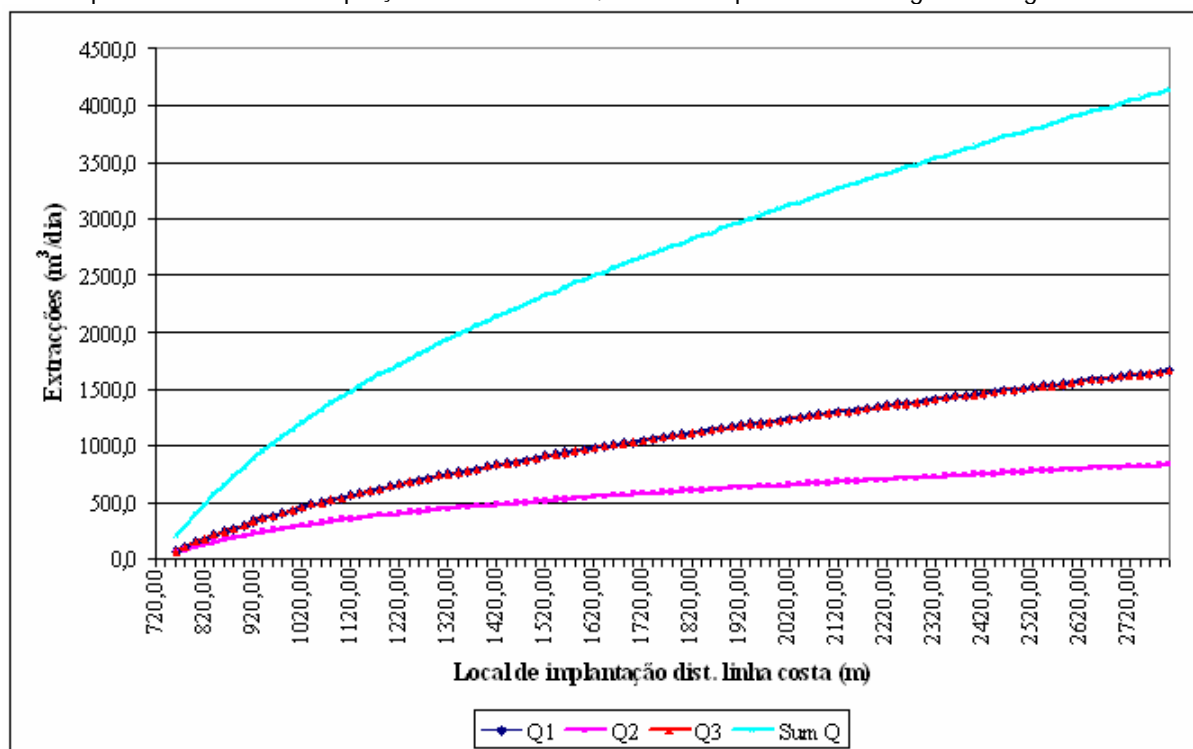


Figura 2 – Extracção vs dist. à linha de costa da implantação das 3 captações para altura da superfície do mar $B = 14,10$ m e $ds = 300$ m e $q=0,6\text{m}^2/\text{dia}$

Na figura seguinte pode verificar-se a redução na extracção máxima nas 3 captações quando implantadas a 1100,0 m da linha de costa em função da altura da superfície do mar quando se pretende uma distância de segurança de $ds = 300$ m.

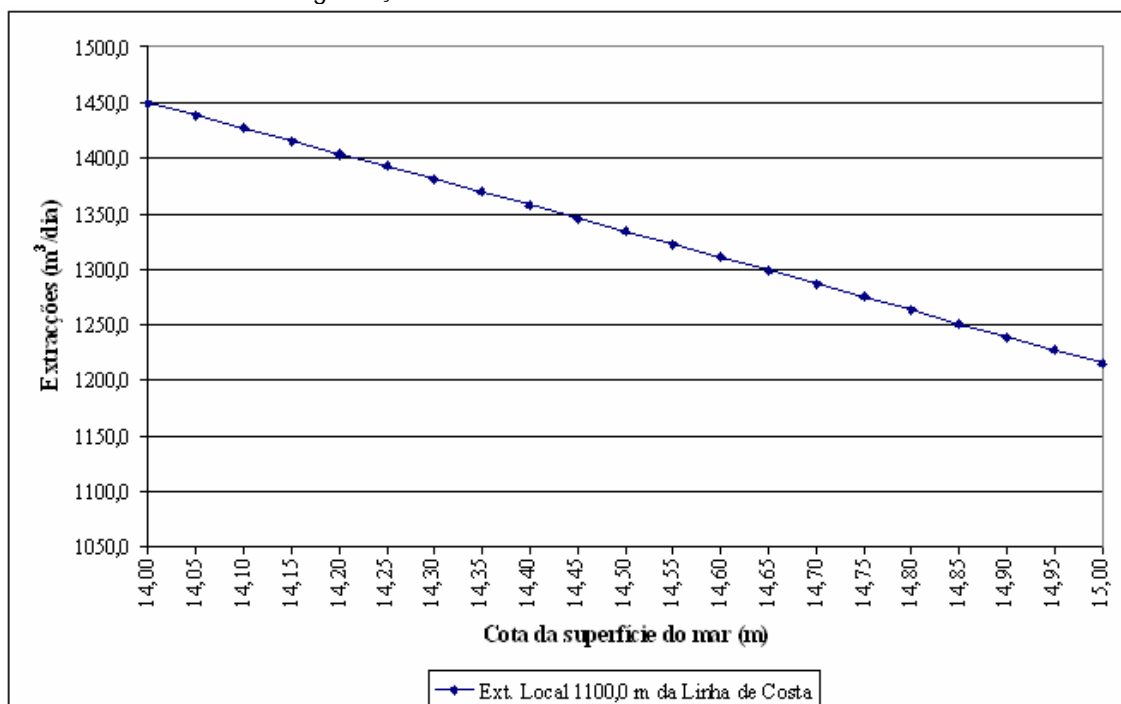


Figura 3 – Extracção máxima vs altura da superfície do mar para implantação das 3 captações a 1100,0 m da linha de costa e $ds = 300$ m e $q=0,6\text{m}^2/\text{dia}$

Na figura seguinte representam-se as curvas de redução nas extracções em relação à situação inicial ($B=14,0$ m) em função da distância à linha de costa do local de implantação das 3 captações e da altura da superfície do mar quando $ds = 300$ m.

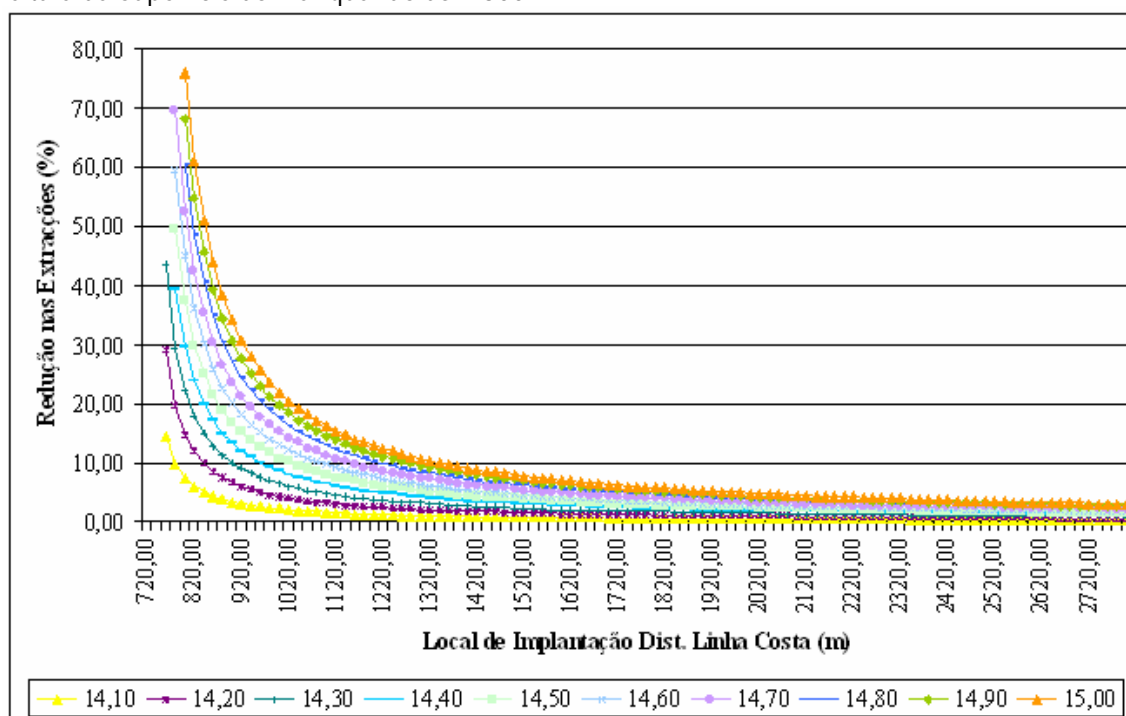


Figura 4 – Redução nas extracções em relação à situação inicial vs dist. à linha de costa do local de implantação das 3 captações e vs altura da superfície do mar e $ds = 300$ m e $q=0,6\text{m}^2/\text{dia}$

Comparando estes resultados com os apresentados em FERREIRA DA SILVA *et al* (2006) onde se reduzia o escoamento específico de acordo com a lei:

$$q = 0,60 - 0,18\Delta h \quad (11)$$

em que: Δh a variação do nível do mar.

então, constata-se que o incremento da recarga através da infiltração para manter o escoamento natural no seu valor inicial de $q=0,6\text{m}^2/\text{dia}$ apresenta vantagens evidentes, designadamente conduz a uma menor redução nas extracções e a uma menor influência da subida do nível do mar em locais mais afastado do mar, ou seja o incremento da recarga por infiltração e a adequada implantação das captações revelam-se como medidas de combate aos efeitos das alterações climáticas. O acréscimo na capacidade de extracção em relação aos resultados sem incremento da recarga está representado na figura seguinte:

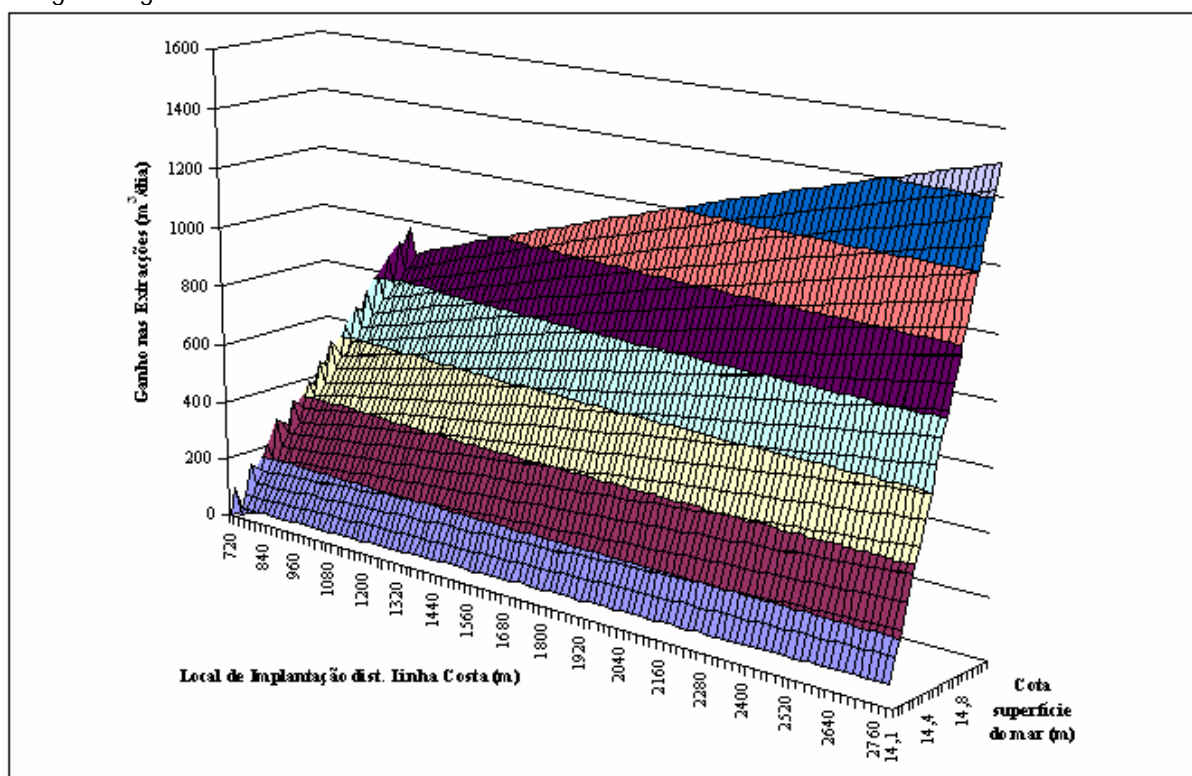


Figura 5 - Ganho nas extracções mantendo $q=0,6\text{m}^2/\text{dia}$ em relação à situação de redução de q para $ds=300,0$ m em função da altura do nível do mar

5.2 - EXTRACÇÕES MÁXIMAS NUMA BARREIRA DE TRÊS CAPTAÇÕES VERSUS LOCAL DE IMPLANTAÇÃO COM AUMENTO DO NÍVEL DO MAR E INCREMENTO DA RECARGA POR INJECCÃO

O problema que pretende resolver-se neste item consiste em determinar qual será a extracção máxima numa barreira de três captações para que seja assegurado o controlo da intrusão salina quando existe um sistema de incremento da recarga, por injeccão em furos situados a 500 m das captações, onde é possível injectar $QR_i = 50 \text{ m}^3/\text{dia}$ ($i=1,2,3$) em cada um dos três poços.

Admitindo-se como cenário uma redução máxima do escoamento natural em 30% se a subida do nível do mar for de 1,0 m, então a relação entre o caudal por metro linear e a variação do nível do mar será a quantificada pela equação 11. Nestas circunstâncias as melhores políticas de extracção para o conjunto das três captações para uma subida do nível do mar de 0,50 m e quando a distância de segurança (ds) é de 300 m e $q = 0,51 \text{ m}^2/\text{dia}$ são as registadas no quadro seguinte:

Quadro 4 - Extracções em 3 captações vs local de implantação para $ds=300\text{m}$ $B=14,50\text{m}$ e $q=0,51\text{m}^2/\text{dia}$ com $QR_i = 50\text{ m}^3/\text{dia}$

Local (m)	Q_1 (m^3/dia)	Q_2 (m^3/dia)	Q_3 (m^3/dia)	Sum Q (m^3/dia)
860.00	84,60	72,07	84,60	241,28
(...)				
1000.00	265,07	188,73	265,07	718,86
(...)				
2000.00	994,42	546,47	994,42	2535,31
(...)				
2800.00	1378,28	711,60	1378,28	3468,15

Sendo: Q_1 , Q_2 , Q_3 as extracções máximas, respectivamente, nas captações 1, 2 e 3 (m^3/dia) e Sum Q a extracção total na barreira (m^3/dia), QR_i a injeccção de $50\text{ m}^3/\text{dia}$ em furos que distam 500 m das captações.

A quantidade total máxima que será possível extrair na barreira de 3 captações em função do local de implantação e da subida do nível do mar para uma distância de segurança de $300,0\text{ m}$ fica representada na figura seguinte:

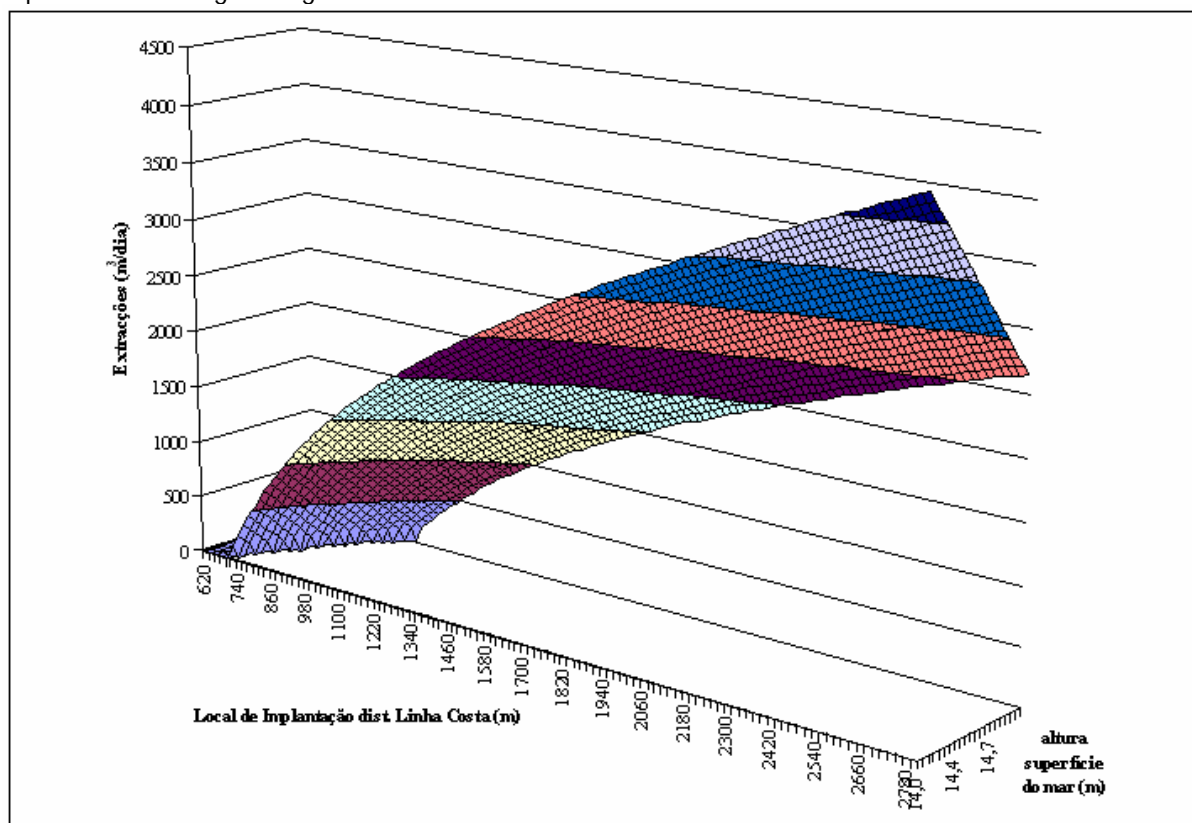


Figura 6 - Extracção total máxima em 3 captações vs local de implantação para $ds=300\text{ m}$ vs altura da água do mar e $q=0,6\text{m}^2/\text{dia}$

Na figura seguinte pode verificar-se a redução na extracção máxima nas 3 captações quando implantadas a $1100,0\text{ m}$ da linha de costa em função da altura da superfície do mar quando se pretende uma distância de segurança de $ds = 300\text{ m}$.

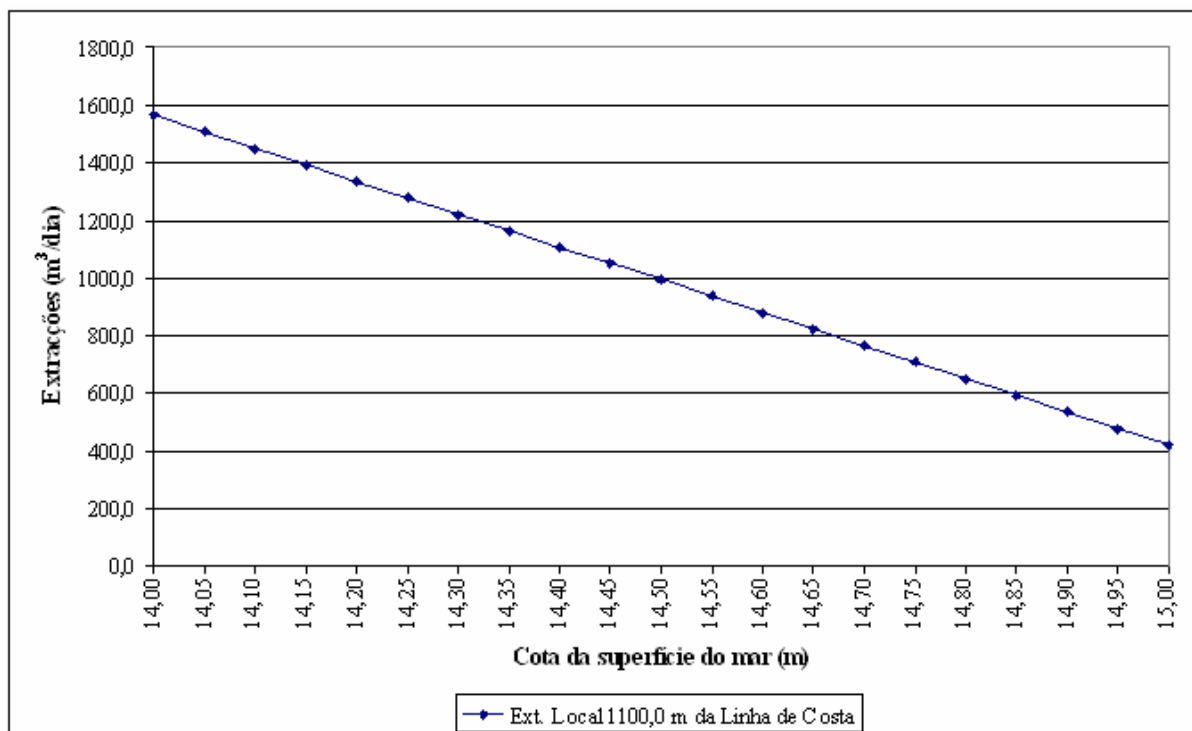


Figura 7 - Extracção máxima vs altura da superfície do mar para implantação das 3 captações a 1100,0 m da linha de costa e $ds = 300$ m e $q=0,6\text{m}^2/\text{dia}$

Na figura seguinte representam-se as curvas de redução nas extracções em relação à situação inicial ($B=14,0$ m) em função da distância à linha de costa do local de implantação das 3 captações e da altura da superfície do mar quando $ds = 300$ m.

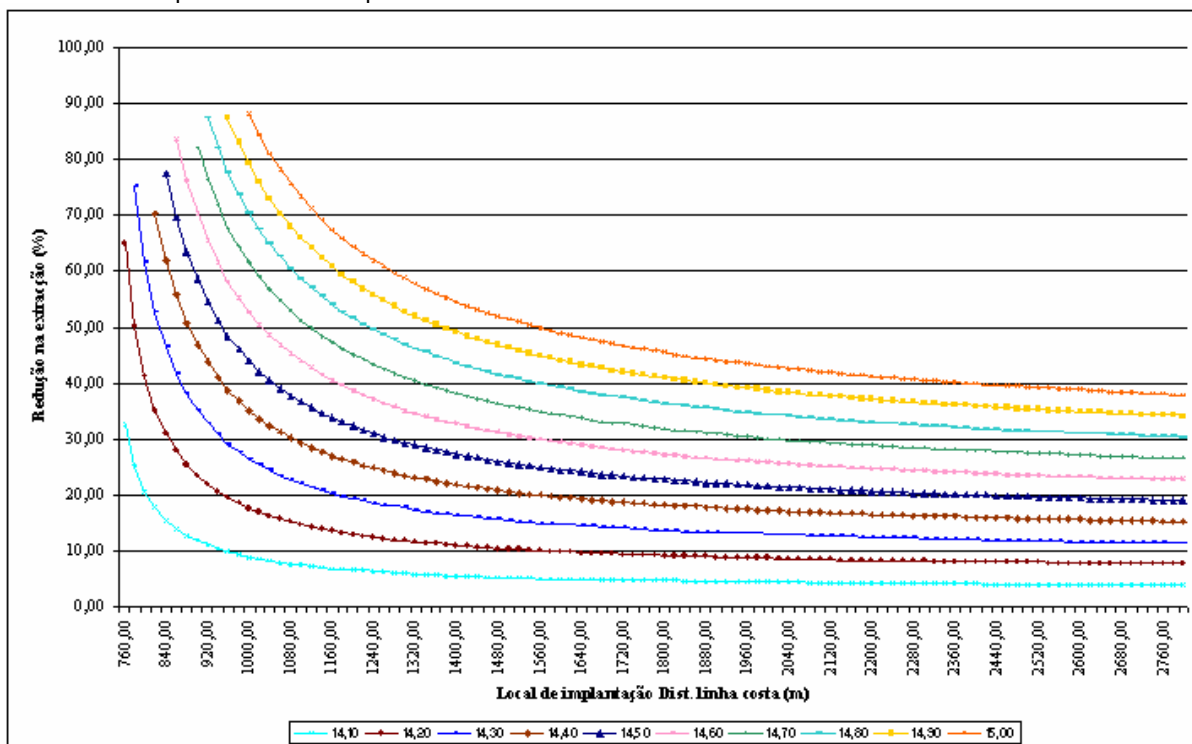


Figura 8 - Redução nas extracções em relação à situação inicial vs dist. à linha de costa do local de implantação das 3 captações e vs altura da superfície do mar e $ds = 300$ m com $QR_i = 50 \text{ m}^3/\text{dia}$

Comparando estes resultados com os apresentados em FERREIRA DA SILVA *et al* (2006) onde se reduzia o escoamento específico de acordo com a equação 11 então, constata-se que o incremento da recarga através por injeção apresenta vantagens evidentes, designadamente conduz a uma menor redução nas extracções, ou seja o incremento da recarga revela-se como uma medida de combate aos efeitos das alterações climáticas. O acréscimo na capacidade de extracção em relação aos resultados sem incremento da recarga com a subida do nível do mar em 0,50 m para $ds=300,0$ m em função do local de implantação das captações está representado na figura seguinte:

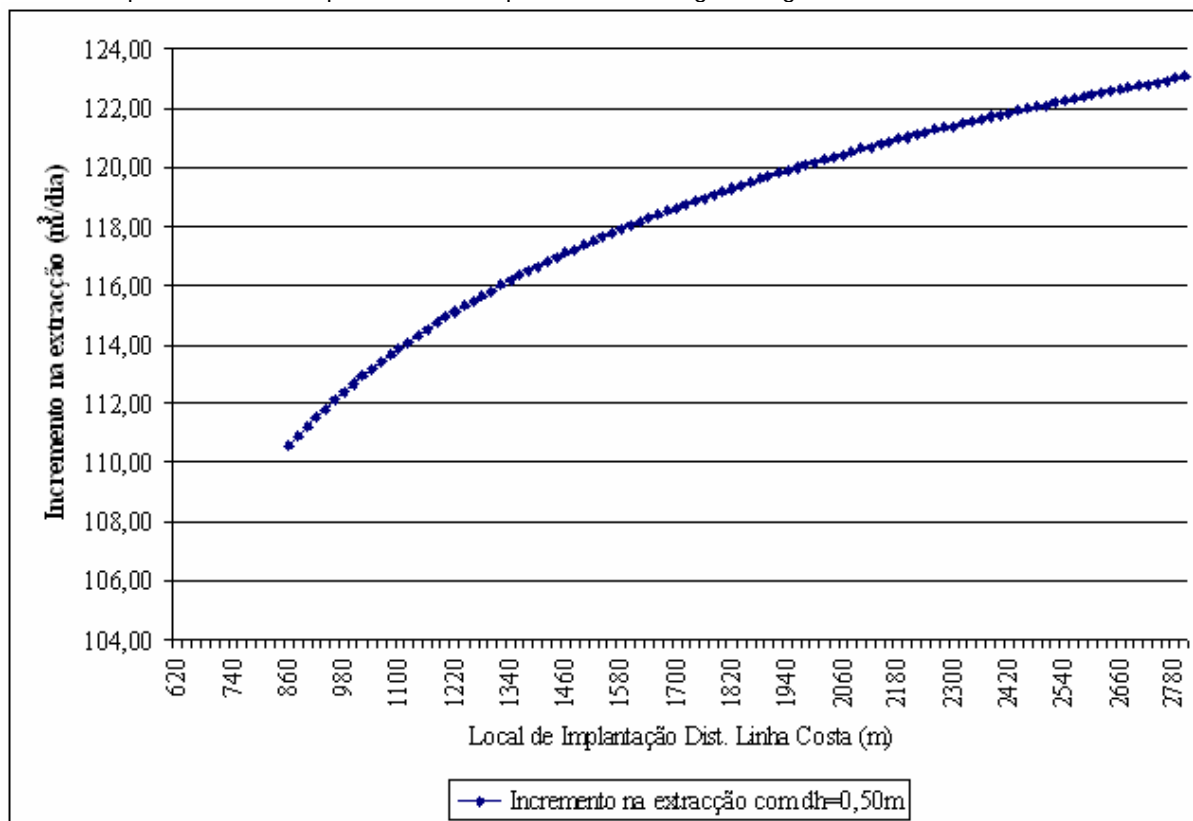


Figura 9 – Incremento nas extracções com $QR_i = 50$ m³/dia em relação à situação sem incremento da recarga e subida do nível do mar em 0,50 m para $ds=300,0$ m em função do local de implantação das captações.

6 CONCLUSÕES

Os aquíferos do litoral são sistemas em equilíbrio dinâmico e, como tal, à subida do nível do mar ou ao aumento das extracções e/ou à redução da recarga pode corresponder o avanço da cunha salina marinha. Sendo a “produção” de água de abastecimento a partir de origens subterrâneas economicamente vantajosa, poderá ser tentador a exploração daqueles reservatórios naturais. No entanto, interessa que as extracções sejam determinadas para que fiquem prevenidos os efeitos nefastos da intrusão salina, em especial os provocados pela eventual subida do nível do mar resultante das alterações climáticas. Assim, o planeamento e a gestão sustentáveis da utilização de aquíferos costeiros consiste na conveniente localização das captações e dos sistemas de controlo da intrusão salina, ou seja dos locais de incremento da recarga, bem como na definição das quantidades a extrair e infiltrar ou injectar para incremento da recarga. Estas medidas contribuem para manter sob controlo o volume de água salgada no aquífero.

Os aquíferos, designadamente os situados nas zonas costeiras, não devem apenas ser considerados como mananciais a preservar como reserva estratégica, mas sim como origens que devem ser utilizadas de forma contínua, no entanto controlada.

Os resultados dos estudos realizados permitem concluir que o incremento da recarga pode ser usado como medida de gestão dos aquíferos costeiros. Esta medida permite o aproveitamento de recursos hídricos a baixo custo, contribui para o controlo da cunha salina e possibilita o aumento das extracções de água doce. Adopta-se, assim, uma perspectiva global na gestão dos recursos hídricos disponíveis nas regiões costeiras.

A implementação de um sistema de incremento da recarga de um aquífero envolve a realização de estudos técnico-económicos multidisciplinares. No entanto, a análise quantitativa dos efeitos da recarga na gestão de aquíferos do litoral potencialmente sujeitos à intrusão salina recomendam o incremento da infiltração e/ou da injeção das águas superficiais ou pluviais ou residuais tratadas. Sendo possível a utilização dos recursos hídricos superficiais vizinhos e desde que o custo da operação de incremento da recarga se mantenha reduzido, então os resultados do modelo de gestão poderão revelar-se, também, como políticas viáveis de gestão dos recursos hídricos disponíveis nas regiões costeiras. Este trabalho permite concluir que o incremento da recarga apresenta vantagens evidentes, designadamente conduz a uma menor redução nas extracções em função da subida do nível do mar. Consta-se, também, que incrementando a recarga por infiltração os efeitos da subida do nível do mar são função do local de implantação das captações, reduzindo em direcção ao continente. Assim, os efeitos das alterações climáticas poderão ser atenuados com o incremento da recarga e a adequada implantação das captações.

As soluções disponibilizadas constituem uma parcela de um conjunto de acções que poderão ser implementadas para uma utilização conjuntiva, controlada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais das áreas costeiras.

AGRADECIMENTOS

O autor regista o apoio dado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia ao Centro de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

BIBLIOGRAFIA

1. BAKKER, Mark e SCHARS, F. - "The Sea Water Intrusion (SWI) Package Manual", Version 1, Dezembro, 2002;
2. FERREIRA DA SILVA, Júlio - "Gestão optimizada à escala regional de sistemas aquíferos potencialmente sujeitos à intrusão salina - Um modelo global para o uso sustentável da água em regiões costeira", Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil - Hidráulica, Universidade do Minho, 2003;
3. FERREIRA DA SILVA, Júlio; NAIM HAIE e JOSÉ M. P. VIEIRA - "Análise dos efeitos do incremento da recarga na gestão de aquíferos costeiros", 6.º SILUSBA. Cabo Verde, 10/14 Novembro, 2003;
4. FERREIRA DA SILVA, Júlio e HAIE, NAIM - "Utilização controlada e sustentável de aquíferos costeiros. Estudos para o aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos disponíveis no sistema aquífero Mexilhoeira Grande - Portimão", Jornadas Luso-Espanholas As Águas subterrâneas no sul da península Ibérica. Faro, 23/26 Junho, 2003;
5. FERREIRA DA SILVA, Júlio e RIBEIRO, Luís T. - "EFEITOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E DA SUBIDA DO NÍVEL DO MAR NOS AQUÍFEROS COSTEIROS", 8.º Congresso da água. Lisboa, Março, 2006;
6. SANTOS, F. D., K. FORBES and R. MOITA - "Climate change in Portugal scenarios, impacts and adaptation measures - SIAM project", Gradiva, Fundação Calouste Gulbenkian, FCT; 2002;
7. STRACK, O. D. L. - "A Single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers", Water Resources Research, 12, 1976, pp. 1165-1174;
8. STRACK, O. D. L. - "Groundwater Mechanics", Prentice Hall, 1989.